

УДК 621.316

А.Л. Куликов, П.С. Пелевин, А.А. Лоскутов

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ НА КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНЫХ ЛЭП С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУСТОРОННИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предложен новый способ автоматического повторного включения кабельно-воздушных линий электропередачи (АПВ КВЛ) на основе волновых методов, позволяющий повысить надежность защиты КВЛ. Определение поврежденного участка осуществляется на основе оценки уровня волновых сигналов, что задает простоту метода и пониженные требования к соответствующим алгоритмам цифровой обработки. Показано, что в зависимости от поврежденного участка КВЛ и места повреждения высокочастотные переходные составляющие претерпевают различное затухание на пути к месту измерения. Расчет отношения величин сигналов по двум концам КВЛ позволяет с высокой селективностью определить поврежденный участок. Для оценки метода проведено имитационное моделирование повреждений на КВЛ, при этом учитывались искажения, вносимые линией, оборудованием ПС и вторичными цепями измерительных трансформаторов. Результаты моделирования показали, что поврежденный участок определяется верно в подавляющем большинстве случаев КЗ на КВЛ. Исключением являются КЗ на воздушном участке в пределах небольшой зоны вблизи КВЛ перехода, составляющей несколько десятков-сотен метров, при которых АПВ блокируется.

Ключевые слова: автоматическое повторное включение, кабельно-воздушные ЛЭП, переходные процессы, цифровая обработка сигналов.

Введение

Автоматическое повторное включение (АПВ) линий электропередачи (ЛЭП) является функцией релейной защиты и автоматики (РЗА), способствующей повышению надежности электропередачи. Однако в случае кабельно-воздушных ЛЭП (КВЛ) применение функции АПВ без определения поврежденного участка (неселективное АПВ КВЛ) приводит к дополнительному ущербу в случае наличия повреждения на кабеле (КЛ). Таким образом, неселективное АПВ КВЛ не позволяет в полной мере повысить надежность электропередачи. Следовательно, необходимо применение селективного АПВ КВЛ, при котором перед циклом АПВ определяется поврежденный участок КВЛ и при повреждении на кабеле АПВ блокируется. В тоже время существующие методы селективного АПВ КВЛ [1-3] обладают недостатками, снижающими их эффективность [4], в частности, требуют использования большого числа оборудования и специальных каналов связи. Более перспективными являются методы на основе оценки высокочастотных (волновых) составляющих сигналов тока и напряжения [5]. При этом разработанный метод оценки поврежденного участка на основе односторонних измерений требует относительно сложной цифровой обработки и предъявляет повышенные требования к вычислительной мощности реализующего его устройства [5].

Целью статьи является разработка нового метода определения поврежденного участка для АПВ КВЛ, основанного на двусторонних измерениях и упрощенной обработке сигналов. Известен способ АПВ КВЛ на основе адаптированного алгоритма двустороннего волнового определения места повреждения (ОМП) [6]. Отличие разработанного метода от известного способа [6] заключается в том, что используются несинхронизированные измерения по двум концам ЛЭП (независимые измерения) и не требуется фиксация времени прихода волн к месту измерения. Оценка поврежденного участка осуществляется лишь на основе оценки уровня (амплитуды) волнового сигнала, что определяет его простоту. Возможность такой оценки становится понятной при рассмотрении процесса распространения волн в условиях повреждения на КВЛ.

Особенности переходного процесса при повреждении КВЛ, используемые при определении поврежденного участка

Рассмотрим начало переходного процесса при повреждении ЛЭП. От места повреждения вдоль проводов ЛЭП к разным ее концам начинают распространяться электромагнитные волны (бегущие волны). При однофазных замыканиях амплитуда фронта первого импульса волнового сигнала в поврежденной фазе в основном зависит от величины фазного напряжения (от фазы напряжения) и переходного сопротивления в точке повреждения. При двухфазных повреждениях амплитуда фронта волнового импульса зависит от фазы соответствующего линейного напряжения. Распространение волн по ЛЭП связано с затуханием и дисперсией. Поэтому амплитуда фронта волны с продвижением по ЛЭП уменьшается, а форма импульса изменяется. Для однопроводной линии величина напряжения в некоторой точке может быть описана выражением (1), а величина тока – выражением (2) [7]:

$$u(t, x) = f_{nad}(t) \cdot e^{-\gamma \cdot x} + f_{omp}(t) \cdot e^{\gamma \cdot x}, \quad (1)$$

$$i(t, x) = \frac{f_{nad}(t)}{Z_в} \cdot e^{-\gamma \cdot x} - \frac{f_{omp}(t)}{Z_в} \cdot e^{\gamma \cdot x}, \quad (2)$$

где $f_{пад}$, $f_{отр}$ – функция падающей и отраженной волны напряжения соответственно; γ – комплексный коэффициент распространения; $Z_в$ – волновое сопротивление.

Зачастую пренебрегают относительно малой мнимой составляющей комплексной величины волнового сопротивления и представляют его чисто активным сопротивлением. При измерении токов и напряжений на подстанции (ПС) примем за направление распространения падающей волны – направление из ЛЭП к шинам ПС, а за положительное направление тока в линии – направление от шин ПС. Тогда выражения для напряжения и тока в месте измерения могут быть записаны в упрощенном виде (3), (4):

$$u_{изм}(t) = u_{nad}(t) + u_{omp}(t); \quad (3)$$

$$i_{изм}(t) = -i_{nad}(t) + i_{omp}(t) = -\frac{u_{nad}(t)}{Z_в} + \frac{u_{omp}(t)}{Z_в}. \quad (4)$$

Когда волна достигает неоднородности ЛЭП (место соединения двух участков с разными волновыми сопротивлениями), например, место кабельно-воздушного перехода, часть энергии волны отражается и начинает распространяться в обратном направлении (образуется отраженная волна), а другая часть – проходит за место неоднородности (прошедшая волна) (рис. 1). Частью энергии, которая рассеивается в месте соединения двух разнородных участков, обычно пренебрегают.

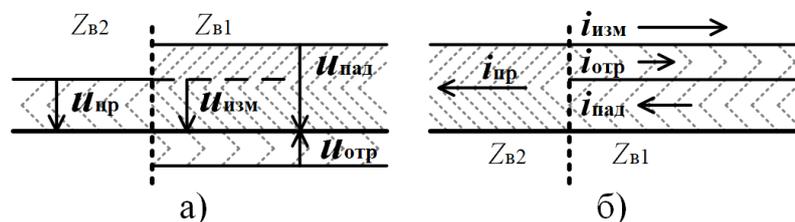


Рис. 1. Соотношения напряжений и токов бегущих волн на границе неоднородности

Напряжение и ток на границе раздела двух разнородных участков (рис. 1), таким образом, характеризуются следующими выражениями (5), (6), (7):

$$u_{изм}(t) = u_{nad}(t) + k_{omp} \cdot u_{nad}(t) = u_{np}(t) = k_{np} \cdot u_{nad}(t), \quad (5)$$

$$i_{изм}(t) = -\frac{u_{nad}(t)}{Z_{в1}} + k_{omp} \cdot \frac{u_{nad}(t)}{Z_{в1}} = -i_{np}(t) = -(1 + k_{omp}) \cdot \frac{u_{nad}(t)}{Z_{в2}}, \quad (6)$$

$$k_{omp} = \frac{Z_{в2} - Z_{в1}}{Z_{в1} + Z_{в2}}; \quad k_{np} = \frac{2 \cdot Z_{в2}}{Z_{в1} + Z_{в2}}, \quad (7)$$

где $k_{отр}$, $k_{пр}$ – коэффициент отражения и прохождения (преломления) волны напряжения.

Для случая ВЛ-КЛ перехода $Z_{в1} = Z_{в.КЛ}$, $Z_{в2} = Z_{в.ВЛ}$, а для КЛ-ВЛ перехода $Z_{в1} = Z_{в.ВЛ}$, $Z_{в2} = Z_{в.КЛ}$. Те же соотношения справедливы также для места присоединения ЛЭП к ПС. При этом $Z_{в1} = Z_{в.ЛЭП}$, а $Z_{в2} = Z_{экв.ПС}$, где $Z_{экв.ПС}$ – эквивалентное сопротивление ПС. Если пренебречь емкостями первичного оборудования ПС, а также ВЧ присоединениями, то $Z_{экв.ПС}$ определяется как параллельное соединение волновых сопротивлений присоединений ПС. В противном случае следует пользоваться рекомендациями [8-9].

Необходимо отметить, что приведенные выше соотношения справедливы для однопроводной линии, в то время как для многопроводных линий необходимо переходить к телеграфным уравнениям [8]. Однако при анализе электромагнитных волн в первом междуфазном волновом канале сохраняется справедливость ранее полученных выражений и выводов [8]. Таким образом, электромагнитная волна, распространяясь по ЛЭП с неоднородными участками – такими, как КВЛ, претерпевает дополнительное затухание, связанное с рассогласованностью волновых сопротивлений разных участков [9]. В зависимости от поврежденного участка КВЛ и места повреждения электромагнитные волны претерпевают различное затухание на пути к ПС и месту измерения. Поэтому, измерив амплитуду фронта волнового сигнала, можно косвенно определить поврежденный участок. Однако на основе только односторонних измерений сделать вывод о поврежденном участке затруднительно из-за зависимости амплитуды фронта от фазы напряжения в момент КЗ и переходного сопротивления. Целесообразно использовать измерения по двум концам ЛЭП, причем отношение сигналов токов или напряжений по двум концам КВЛ позволяет практически селективно определить поврежденный участок.

Основные принципы реализации селективного АПВ КВЛ

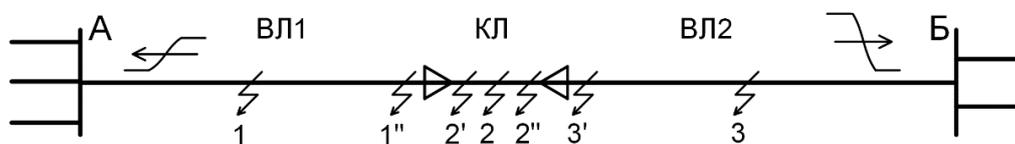


Рис. 2. Схематичное изображение КВЛ с конфигурацией ВЛ-КЛ-ВЛ

Рассмотрим основные принципы реализации селективного АПВ КВЛ (рис. 2). Здесь показана ВЛ с кабельной вставкой на удалении от обоих ПС А и Б (конфигурация ВЛ-КЛ-ВЛ). Каждому участку (m -ый участок) соответствуют свои параметры: волновое сопротивление $Z_{в.m}$ и затухание. Затухание может быть выражено через коэффициент затухания m -го участка $k_{зат.m}$, характеризующий отношение амплитуды падающей волны напряжения в конце m -го участка к амплитуде сигнала в начале участка. Отметим, что расчет коэффициента $k_{зат.m}$ может осуществляться с использованием имитационной модели КВЛ. Можно оценить коэффициент затухания в децибелах с учетом методик, используемых для расчета затухания линейного тракта ЛЭП для высокочастотной связи [8-9]. В этом случае $k_{зат.m}$ определяется по выражению [9] (8):

$$k_{зат.m} = e^{-0.115 \cdot \alpha_m \cdot L_m}, \quad (8)$$

где α_m – коэффициент затухания соответствующей модальной составляющей для m -ого участка КВЛ, дБ/км; L_m – длина m -ого участка КВЛ.

Определим напряжение фронта падающей волны по концам КВЛ при повреждениях на различных участках (рис. 2).

Для 1-го участка ЛЭП имеют место соотношения (9), (10), (11):

$$U_{над.А} = U_0 \cdot k_{зат.1}^{L_{КЗ.1}/L_1}, \quad (9)$$

$$U_{над.Б} = U_0 \cdot k_{зат.1}^{(L_1 - L_{КЗ.1})/L_1} \cdot k_{пр.1-2} \cdot k_{зат.2} \cdot k_{пр.2-3} \cdot k_{зат.3}, \quad (10)$$

$$\frac{u_{над.А}}{u_{над.Б}} = \frac{1}{k_{np.1-2} \cdot k_{np.2-3}} \cdot \frac{1}{k_{зам.2} \cdot k_{зам.3}} \cdot k_{зам.1}^{(2 \cdot L_{КЗ.1} - L_1) / L_1}, \quad (11)$$

где $k_{np.m-n}$ – коэффициент прохождения неоднородности, характерный m -му участку ЛЭП и n -му элементу ЛЭП и предполагающий, что волны напряжения движутся со стороны m -го участка; $L_{КЗ.m}$ – расстояние до места повреждения от начала m -го участка КВЛ. В качестве элемента ЛЭП принимается место КЗ, шины ПС, участок ЛЭП.

Для 2-го и 3-го участка ЛЭП справедливы равенства (12) и (13) соответственно:

$$\frac{u_{над.А}}{u_{над.Б}} = \frac{k_{np.2-1}}{k_{np.2-3}} \cdot \frac{k_{зам.1}}{k_{зам.3}} \cdot k_{зам.2}^{(2 \cdot L_{КЗ.2} - L_2) / L_2}, \quad (12)$$

$$\frac{u_{над.А}}{u_{над.Б}} = k_{np.2-1} \cdot k_{np.3-2} \cdot k_{зам.1} \cdot k_{зам.2} \cdot k_{зам.3}^{(2 \cdot L_{КЗ.3} - L_3) / L_3}. \quad (13)$$

Выражения (11-13) характеризуют соотношения сигналов напряжения на концах КВЛ при повреждениях на различных участках. Однако при повреждениях, близких к местам неоднородности, волны, последовательно отражающиеся от неоднородности и от места повреждения, достигают места измерения через очень короткое время после первой волны от повреждения. Поэтому в таких случаях на измерения амплитуды фронта напряжения будут влиять эти дополнительные отраженные волны.

Рассмотрим соотношения сигналов напряжения при повреждении ЛЭП в непосредственной близости от КВЛ перехода. При этом не учитываем затухание волн на участке между точкой повреждения и КВЛ переходом ввиду малого расстояния.

Для точки 1'' справедливы следующие выражения (14), (15), (16):

$$U_{над.А} = U_0 \cdot k_{зам.1} \cdot (1 + k_{np.1-КЗ} \cdot (k_{отр.1-2} + k_{отр.1-2}^2 \cdot k_{отр.1-КЗ} + \dots)) = U_0 \cdot k_{зам.1} \cdot (1 + k_{np.1-КЗ} \cdot \frac{k_{отр.1-2}}{1 - k_{отр.1-2} \cdot k_{отр.1-КЗ}}), \quad (14)$$

$$U_{над.Б} = [U_0 \cdot k_{np.1-2} \cdot k_{зам.2} \cdot k_{np.2-3} \cdot k_{зам.3}] \cdot (1 + k_{отр.1-2} \cdot k_{отр.1-КЗ} + \dots) = [\dots] \cdot \left(\frac{1}{1 - k_{отр.1-2} \cdot k_{отр.1-КЗ}} \right), \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{u_{над.А}}{u_{над.Б}} &= \left[\frac{1}{k_{np.1-2} \cdot k_{np.2-3}} \cdot \frac{k_{зам.1}}{k_{зам.2} \cdot k_{зам.3}} \right] \cdot \frac{1 + \frac{k_{np.1-КЗ} \cdot k_{отр.1-2}}{1 - k_{отр.1-2} \cdot k_{отр.1-КЗ}}}{\frac{1}{1 - k_{отр.1-2} \cdot k_{отр.1-КЗ}}} = \\ &= [\dots] \cdot (1 - k_{отр.1-2} \cdot k_{отр.1-КЗ} + k_{np.1-КЗ} \cdot k_{отр.1-2}) = \\ &= [\dots] \cdot (1 + k_{отр.1-2} \cdot (k_{np.1-КЗ} - k_{отр.1-КЗ})) = \\ &= [\dots] \cdot (1 + k_{отр.1-2}) = [\dots] \cdot k_{np.1-2} = \frac{k_{зам.1}}{k_{np.2-3} \cdot k_{зам.2} \cdot k_{зам.3}} \end{aligned} \quad (16)$$

Для точки 2' отношение напряжений падающих волн характеризуется равенством (17):

$$\begin{aligned} \frac{u_{над.А}}{u_{над.Б}} &= \left[\frac{k_{np.2-1}}{k_{np.2-3}} \cdot \frac{k_{зам.1}}{k_{зам.2} \cdot k_{зам.3}} \right] \cdot \frac{\frac{1}{1 - k_{отр.2-1} \cdot k_{отр.2-КЗ}}}{1 + \frac{k_{np.2-КЗ} \cdot k_{отр.2-1}}{1 - k_{отр.2-1} \cdot k_{отр.2-КЗ}}} = \\ &= [\dots] \cdot \frac{1}{1 - k_{отр.2-1} \cdot k_{отр.2-КЗ} + k_{np.2-КЗ} \cdot k_{отр.2-1}} = [\dots] \cdot \\ &\cdot \frac{1}{1 + k_{отр.2-1} \cdot (k_{np.2-КЗ} - k_{отр.2-КЗ})} = [\dots] \cdot \frac{1}{1 + k_{отр.2-1}} = \\ &= [\dots] \cdot \frac{1}{k_{np.2-1}} = \frac{k_{зам.1}}{k_{np.2-3} \cdot k_{зам.2} \cdot k_{зам.3}} \end{aligned} \quad (17)$$

С учетом преобразований для точек 2'' и 3' получаем следующее выражение для отношения напряжений падающих волн (18):

$$\frac{u_{пад.А}}{u_{пад.Б}} = \frac{k_{пр.2-1} \cdot k_{зам.1} \cdot k_{зам.2}}{k_{зам.3}} \quad (18)$$

На основе равенств (8)-(18) можно построить график зависимости отношения $u_{пад.А} / u_{пад.Б}$ от места повреждения. На рис. 3 а,б показаны такие зависимости для КВЛ 220кВ (конфигурации ВЛ-КЛ-ВЛ) при различных соотношениях длин участков. Параметры распространения волн для рис. 3 выбраны по рекомендациям [9]. Средние значения параметров в диапазоне частот 10-100 кГц составили для первого междуфазного волнового канала: $Z_{в1}=370$ Ом, а $Z_{в2}=30$ Ом, $Z_{в3}=370$ Ом, а $\alpha_{ЛТ.1}=0,023$ дБ/км, $\alpha_{ЛТ.2}=1,1$ дБ/км, $\alpha_{ЛТ.3}=0,022$ дБ/км. Для удобства на рис. 3 показана функция десятичного логарифма от соотношения $u_{пад.А} / u_{пад.Б}$.

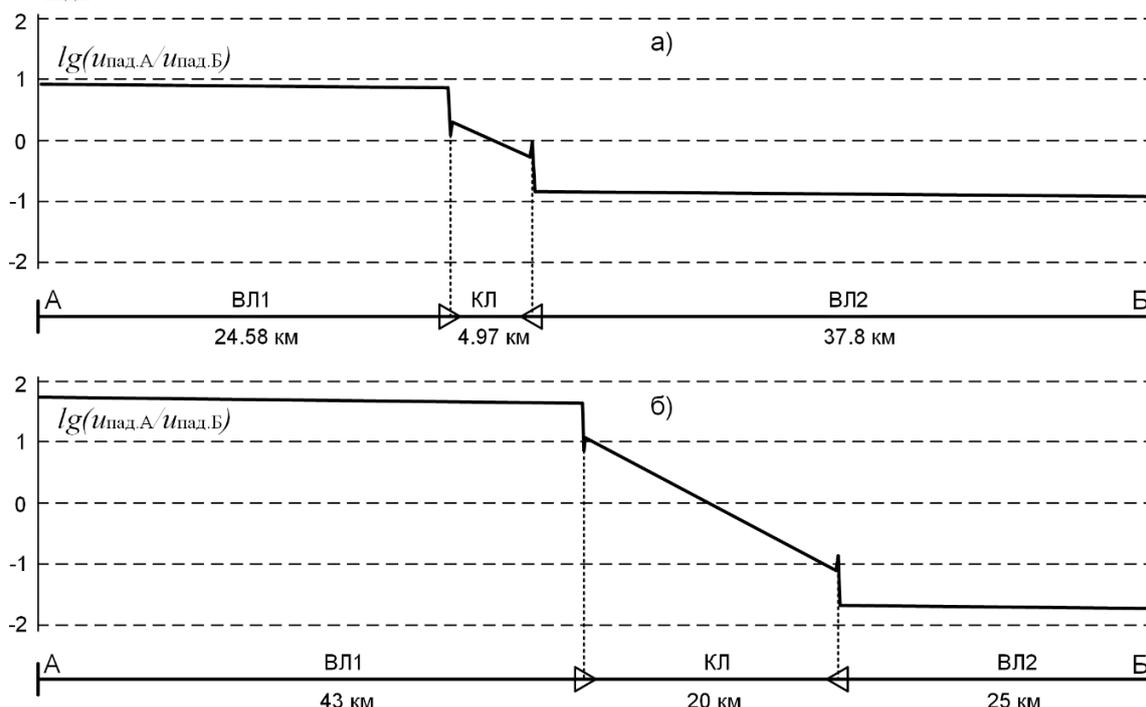


Рис. 3. Зависимости отношения амплитуд падающих волн напряжения по двум концам КВЛ от места повреждения

Анализируя рис. 3. а,б, можно заметить, что при переходе через место соединения участков ВЛ и КЛ логарифм отношения напряжений претерпевает скачок, который зависит от соотношения параметров распространения волн по участкам и не зависит от длин этих участков. Следует отметить, что наличие неоднородностей на участках ЛЭП (например, транспозиция фаз ВЛ или транспозиция экранов КЛ) будет искажать зависимость (рис. 3). Поэтому при формировании сложных зависимостей (рис. 3) с учетом неоднородностей ЛЭП целесообразно применять имитационное моделирование.

Анализ выражений (18) и (19), а также рис. 3 приводит к выводу о том, что в непосредственной близости от КВЛ переходов существует зона неопределенности, в которой КЗ на ВЛ и КЛ участках практически не различаются без применения дополнительных методов распознавания. Поэтому при выборе параметров срабатывания алгоритма распознавания поврежденного участка КВЛ целесообразно зону неопределенности относить к кабельному участку для предотвращения АПВ при повреждениях муфты кабеля и вблизи нее. Проведенное имитационное моделирование КВЛ и соответствующего алгоритма распознавания поврежденного участка показало, что зона неопределенности зависит от методов цифровой фильтрации волновых сигналов тока и напряжения, а также переходных характеристик измерительных трансформаторов [10].

Описание алгоритма распознавания поврежденного участка КВЛ

Последовательность обработки волновых сигналов токов и напряжений по концам КВЛ для предлагаемого метода АПВ включает следующие операции. Сигналы с измерительных преобразователей (например, сигналы напряжения) проходят аналого-цифровое преобразование (АЦП) и поступают в блок цифровой обработки. Вначале осуществляется выделение модальной составляющей первого междуфазного волнового канала ЛЭП с реализацией предварительной фильтрации [10] волнового сигнала. Выбор первой междуфазной модальной составляющей целесообразен потому, что в соответствующем канале параметры распространения волн наиболее стабильны [8]. Далее, из модального сигнала выделяются высокочастотные составляющие. При этом могут применяться цифровые фильтры верхних частот или полосовые фильтры. Например, может использоваться алгоритм фильтрации с центрированием выборки сигнала в скользящем окне данных (удаление постоянной составляющей), согласно выражению [10] (19):

$$\Delta u(n) = u(n) - \bar{u}(n), \quad \bar{u}(n) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} u(n-k), \quad (19)$$

где N – число отсчетов в окне данных (число коэффициентов импульсной характеристики фильтра).

После фильтрации регистрируется максимальное значение (амплитуда) сигнала (Δu_{max}), которое соответствует фронту первой волны напряжения. Измеренные и зафиксированные таким образом величины на концах ЛЭП (Δu_{Amax} и Δu_{Bmax}) передаются по каналу связи между ПС А и ПС Б. После этого происходит косвенная оценка расстояния до повреждения по отношению амплитуд напряжений (Δu_{Amax} и Δu_{Bmax}) и проверка попадания места повреждения в зону блокирования АПВ. В зависимости от результата формируется сигнал на разрешение или блокировку АПВ.

Стоит отметить, что приведенные выше выражения для соотношений сигналов по концам ЛЭП (9)–(18) описывают напряжения падающих волн. Однако следует иметь в виду, что измеряются на ПС не падающие волны, а напряжение и ток, являющиеся суммой падающих и отраженных волн, согласно (3) и (4). Тогда отношение измеряемых величин напряжений может быть выражено в виде (20):

$$\frac{u_A}{u_B} = \frac{(1+k_{отр.1-A}) \cdot u_{над.А}}{(1+k_{отр.3-B}) \cdot u_{над.Б}} = k_{прив.и} \cdot \frac{u_{над.А}}{u_{над.Б}}, \quad (20)$$

где $k_{прив.и}$ – коэффициент приведения, характеризующий количественное отличие напряжений падающих волн и измеряемых напряжений (при данных коэффициентах отражения от шин ПС $k_{прив.и}$ является величиной постоянной).

Если по концам ЛЭП измеряются токи, то аналогичным образом формируется выражение для отношений токов (21):

$$\frac{i_A}{i_B} = \frac{(-1+k_{отр.1-A}) \cdot i_{над.А}}{(-1+k_{отр.3-B}) \cdot i_{над.Б}} = \frac{(-1+k_{отр.1-A}) \cdot Z_{в.3} \cdot u_{над.А}}{(-1+k_{отр.3-B}) \cdot Z_{в.1} \cdot u_{над.Б}} = k_{прив.и} \cdot \frac{u_{над.А}}{u_{над.Б}}, \quad (21)$$

где $k_{прив.и}$ – коэффициент приведения при измерениях тока.

В соответствии с соотношениями (20) и (21) при реализации распознавания волновых процессов отсутствует принципиальная разница, что измерять: ток или напряжение. В тоже время известно, что полоса пропускания трансформаторов тока (ТТ), как правило, шире полосы пропускания трансформаторов напряжения (ТН) [11]. Поэтому при практической реализации предлагаемого способа АПВ КВЛ целесообразно использовать измерения тока. Однако, если на ЛЭП организована ВЧ связь [9], то возможно проводить измерения волновых сигналов напряжения с использованием фильтров присоединения. Также известен способ выделения падающих волн напряжения посредством комбинации сигналов тока и напряжения согласно выражению [7], [11] (22):

$$u_{над.А}(n) = \frac{1}{2} \cdot (u_A(n) - Z_{в.1} \cdot i_A(n)), \quad (22)$$

где $u_{пад.А}(n)$ – выборочное значение вычисляемого сигнала напряжения падающей волны на текущем отсчете n , при измерениях на ПС А; $u_A(n)$, $i_A(n)$ – соответствующие выборочные значения измеряемых на ПС А сигналов напряжения и тока.

При этом с целью снижения уровня помех целесообразно производить отдельную обработку сигналов тока и напряжения, а величину фронта напряжения падающей волны определять по выражению (23):

$$\Delta u_{пад.Аmax} = \frac{1}{2} \cdot (\Delta u_{Аmax} - Z_{в.1} \cdot \Delta i_{Аmax}), \tag{23}$$

где $\Delta u_{пад.Аmax}$ – вычисляемая амплитуда напряжения падающей волны на ПС А; $\Delta u_{Аmax}$, $\Delta i_{Аmax}$ – амплитуды измеряемых волновых сигналов напряжения и тока на ПС А.

Такая обработка позволяет не учитывать $Z_{э.кв.П.С.}$, однако приводит к некоторому усложнению устройства АПВ КВЛ. В ходе имитационных экспериментов применялась как комбинированная цифровая обработка волновых сигналов напряжения и тока (23), так и отдельная (21).

Оценка функционирования разработанного алгоритма АПВ КВЛ на имитационной модели

Моделирование КВЛ осуществлялось в программном комплексе PSCAD [1212]. Модель участка сети с КВЛ для исследования переходных процессов представлена на рис. 4. Дополнительно на рис. 5 приведена модель кабельного участка, входящая в общую модель рис. 4. Полученные на модели волновые сигналы обрабатывались с помощью программного комплекса Mathcad. При этом в волновые сигналы добавлялся белый шум, а также производилась их последующая свертка с импульсными характеристиками ТТ и ТН, полученных по результатам исследования реальных осциллограмм [10], [11]. Таким образом сигнал специально искажался с целью проверки устойчивости разработанного алгоритма к воздействию высокочастотных помех.

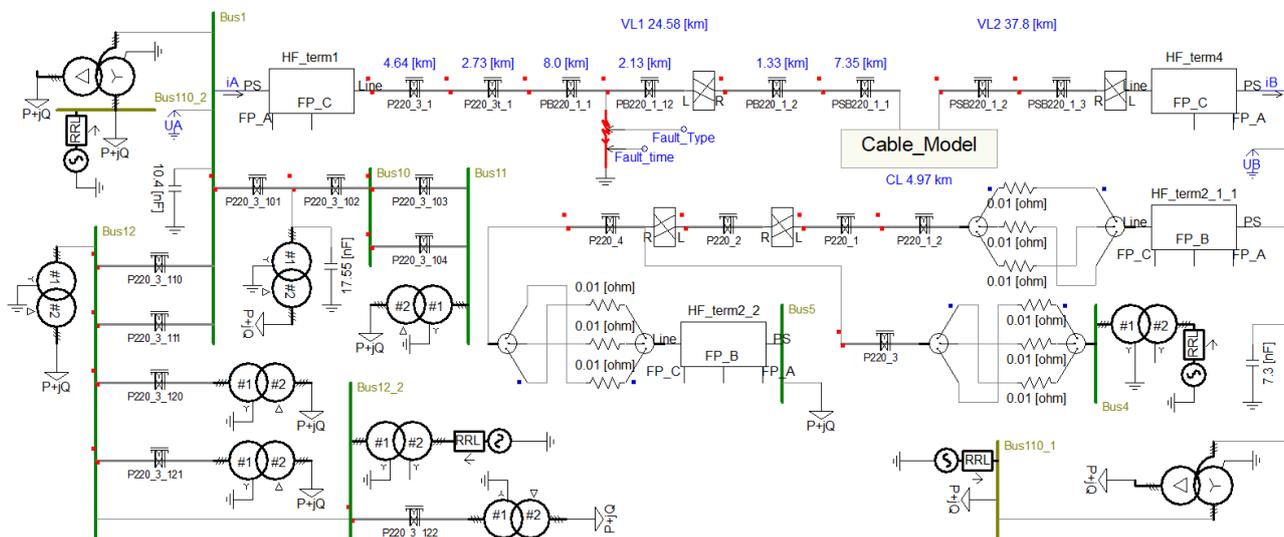


Рис. 4. Модель электрической сети с КВЛ для исследования переходных процессов в PSCAD

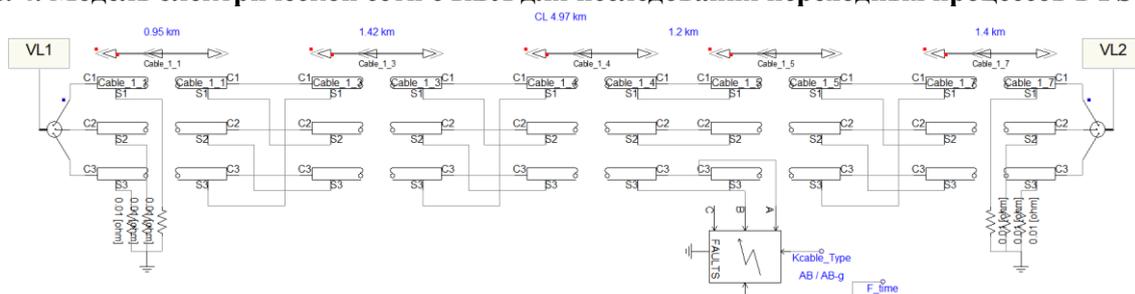


Рис. 5. Модель кабельного участка ЛЭП для общей модели сети

По результатам имитационного моделирования зона блокирования АПВ КВЛ отображалась в виде двумерной области, например, зависимости $|\Delta i_{\text{пад.Аmax}}|$, $|\Delta i_{\text{пад.Бmax}}|$, или $|\Delta i_{\text{Аmax}}|$, $|\Delta i_{\text{Бmax}}|$, как показано на рис. 6 и рис. 7 соответственно. При этом область первого квадранта разбивается лучами (штриховая и штрихпунктирная линии на рис. 6 и 7) на зоны, соответствующие участкам КВЛ. Выбор параметров для процедуры распознавания поврежденного участка при этом сводится к расчету углов наклона данных лучей θ_1 и θ_2 . Также на рис. 6 и 7 символами обозначены случаи, соответствующие однофазным КЗ на разных участках КВЛ и полученные по результатам имитационного моделирования КВЛ. Числа рядом с символами соответствуют расстоянию до места повреждения от начала соответствующего участка.

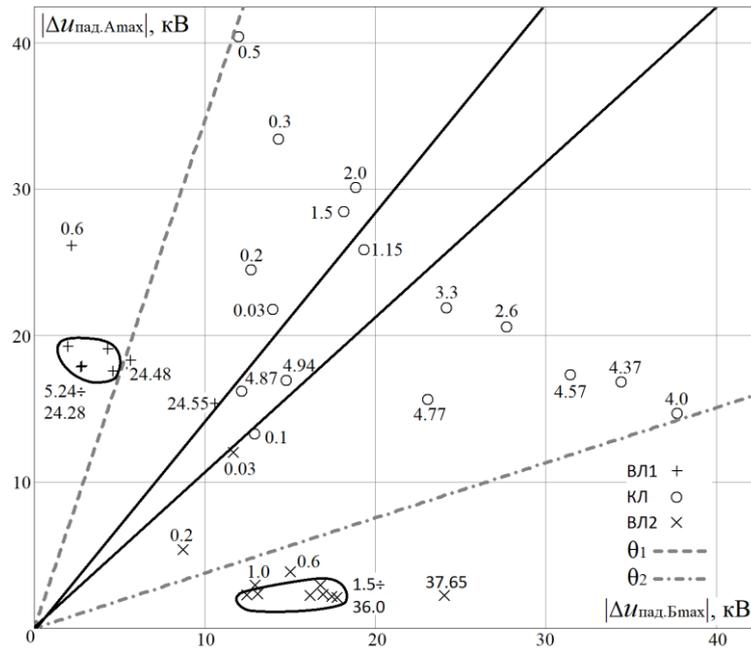


Рис. 6. Отображение зоны блокирования АПВ и тестовых случаев КЗ при оценке комбинированного сигнала согласно выражению (23)

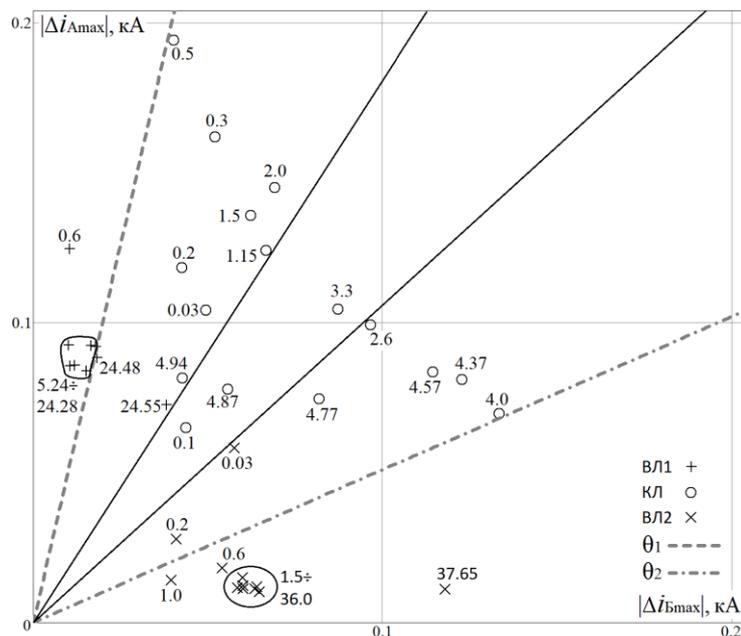


Рис. 7. Отображение зоны блокирования АПВ и тестовых случаев КЗ при оценке только сигнала тока согласно выражению (21)

Точки, соответствующие КЗ на ВЛ и попавшие в зону блокирования, соответствуют КЗ вблизи КВЛ перехода. На рис. 6 и 7 зоны неопределенности вблизи соответствующих КВЛ переходов отделены сплошными черными линиями. При имитационном моделировании зона неопределенности на ВЛ достигала не более 100 м.

Целесообразно при попадании КЗ в ту или иную зону неопределенности блокировать АПВ, а также реализовать визуальный осмотр соответствующего участка КВЛ. Перспективно совмещать АПВ КВЛ с методами ОМП ЛЭП, выполненных, в том числе, на иных (не волновых) методах, для сокращения зоны неопределенности (блокировки) АПВ.

Заключение

Разработан метод с использованием упрощенной обработки волновых сигналов, позволяющий распознать поврежденный участок КВЛ и блокировать АПВ при КЗ на КЛ. Основными требованиями к устройству, реализующему предлагаемый способ АПВ КВЛ, являются применение АЦП с высокой частотой дискретизации (не менее 1 МГц) и наличие канала связи между ПС по концам ЛЭП. При этом не требуется точная синхронизация времени между полукомплектами устройства, в отличие от существующих устройств двустороннего волнового ОМП [6].

Разработанный метод АПВ применим для КВЛ любой конфигурации. Перспективна на основе предложенного способа реализация сверхбыстродействующей волновой релейной защиты ЛЭП [11].

Библиографический список

1. **Догадкин, Д.** Устройство автоматического повторного включения кабельно-воздушных линий электропередачи мегаполисов / Д. Догадкин, Р. Марин, Е. Ширшова, Г. Исмуков, А. Куликов, М. Линт, А. Подшивалин // *Электроэнергия. Передача и распределение*. – 2016. – № 5 (38). – С. 114-119.
2. **Gallastegi, U.A.** Патент на изобретение WO2015033001 (A1). Optical system for identifying faults in mixed power transmission lines / U.A. Gallastegi, L.A. Sanchez. Дата подачи заявки: 04.09.2013. Опубликовано: 12.03.2015. Оптическая система идентификации повреждения на смешанных линиях электропередачи.
3. **Нудельман, Г.С.** Патент на изобретение RU2669542 (C1). Система селективного блокирования автоматического повторного включения на комбинированных кабельно-воздушных линиях электропередачи / Г.С. Нудельман [и др.] Дата подачи заявки: 12.01.2018. Опубликовано: 11.10.2018.
4. **Пелевин, П.С.** Повышение надежности кабельно-воздушных линий электропередачи путем организации интеллектуального автоматического повторного включения / П.С. Пелевин, А.А. Лоскутов, Т.Р. Шарафеев // *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 70. Методические и практические проблемы надежности систем энергетики. В 2-х книгах. / Книга 2 / Отв. ред. Н.И. Воропай. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2019. – С. 252-261.*
5. **Куликов, А.Л.** Алгоритм идентификации поврежденного участка на кабельно-воздушных линиях электропередачи на основе распознавания волновых портретов / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, П.С. Пелевин // *Электричество*. – 2018. – №3. – С. 11-17.
6. **Kasztenny, B.** Locating faults before the breaker opens – adaptive autoreclosing based on the location of the fault / Kasztenny B., Guzman A., Mangapathirao V. Mynam, and Titiksha Joshi // *44th Annual Western Protective Relay Conference*. October 2017.
7. **Johns, A.T.** Digital protection for power systems / A.T. Johns, S.K. Salman // Peter Peregrinus Ltd., on behalf of the Institution of Electrical Engineers, London, UK. 1995. – 203 p.
8. **Микуцкий, Г.В.** Высокочастотная связь по линиям электропередачи / Г.В. Микуцкий, В.С. Скитальцев. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 448 с.
9. ПАО «РОССЕТИ» СТО 56947007-33.060.40.052-2010. Методические указания по расчету параметров и выбору схем высокочастотных трактов по линиям электропередачи 35-750 кВ переменного тока.

10. **Куликов, А.Л.** Методы цифровой фильтрации высокочастотных составляющих переходного процесса при ОМП ЛЭП / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, П.С. Пелевин // V Международная научно-практическая конференция РЕЛАВЭКСПО-2019: Сборник докладов научно-технической конференции молодых специалистов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 17-23.
11. **Лачугин, В.Ф.** Принципы построения интеллектуальной релейной защиты электрических сетей / В.Ф. Лачугин, Д.И. Панфилов, А.Л. Куликов, А.А. Рывкин, М.Д. Обалин // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2015. – № 4. – С. 28-37.
12. **Kulikov, A.L.** Modelling of wave processes on power transmission lines to improve the accuracy of fault location / A.L. Kulikov, V.V. Anan'ev, V.Y. Vukolov, P.S. Platonov, V.F. Lachugin // Power Technology and Engineering. – 2016. – Т. 49. – № 5. – P. 378-385.

A.L. Kulikov, P.S. Pelevin, A.A. Loskutov

**THE METHOD OF AUTORECLOSING OF COMBINED OVERHEAD
AND UNDERGROUND CABLE POWER LINES
BASED ON DOUBLE-ENDED MEASUREMENTS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: Developing a new method of selective autoreclosing based on traveling waves, which increases the reliability of the combined lines protection, in contrast with existing methods for selective autoreclosing, having several drawbacks that limit their application.

Methodology: The paper analyzes the particular expressions that describe the travelling waves behavior on the combined overhead and underground cable power lines. The method performance was evaluated with simulation experiments in the PSCAD. There also simulated the distortion of the signals due to high-frequency noises in the line, substation environment influence, and transients in measuring transformers and their secondary circuits.

Findings: There is shown in the paper that high-frequency transients have arrived at the measuring point with different attenuation depending on the faulted section and fault location. Thereby it is possible to identify the faulted section by calculating the relation of signals magnitude measured by the ends of the line. The simulation results show that the developed algorithm correctly identifies the faulted section in most fault cases. The exceptions are faults on the overhead line section within a small zone near the overhead to underground cable transition, at which the autoreclosing is blocked.

Value: The double-ended method of selective autoreclosing based on traveling waves was developed, which increases the reliability of the combined lines protection. The faulted section identified by an assessment of the level of traveling wave signals, which determines the simplicity of the method and reduced requirements for the digital signal processing algorithms.

Key words: autoreclosing, combined overhead and underground cable power lines, transients, traveling waves, digital signal processing.